DOI:10.11931/guihaia.gxzw202401024

水分和土壤微生物对干热河谷山合欢和银合欢生长性状的影响

石磊琦，刘梓钰，王超俊，王垠昊， 杜训秋， 王雪梅*
（绵阳师范学院 资源环境工程学院，四川 绵阳 621000）

摘　要：植被恢复是干热河谷生态恢复的有效途径，干热河谷生态修复的同时也引进了很多外来种。为比较本地种和外来引进种对水分与微生物的响应差异，该文选取当地乡土种山合欢（*Albizia kalkora*）和外来种银合欢（*Leucaena leucocephala*），采用气候箱模拟云南干热河谷地区条件，通过土壤水分控制和微生物接种研究了水分和各自的土壤微生物对两种豆科植物生长发育的影响。结果表明：（1）相比于银合欢，山合欢的种子发芽率、根生物量、根冠比和氮磷比较银合欢高 58.82%、76.13%、90.59%和 18.42%（P<0.05）；（2）干旱条件下山合欢的根生物量和氮浓度比湿润条件低 33.67%和 8.65%（P<0.05），银合欢的株高、地上生物量、根生物量在干旱条件下较湿润条件低了 39.32%、40.06%和 39.61%（P<0.05），表明干旱抑制了植物生长和养分吸收；（3）山合欢在干旱条件下的根瘤数量多于湿润条件（P<0.05），而银合欢在湿润条件与干旱条件下的根瘤数量没有显著性差异；（4）除枯叶生物量比例，土壤微生物接种、土壤微生物与水分的交互作用对山合欢和银合欢的生长并没有造成显著影响。以上研究表明山合欢较银合欢可能更适宜干旱环境，为干热河谷植被恢复物种选择提供一定的理论依据，但土壤微生物对植物生长的影响还值得进一步探索和研究。

关键词：干热河谷，山合欢，银合欢，水分，微生物
中图分类号：Q945　　　　　　　　　　**文献标识码**：A

Effects of water and soil microorganisms on the growth traits of *Albizia kalkora* and *Leucaena leucocephala* in a dry-hot valley

SHI Leiqi, LIU Ziyu, WANG Chaojun, WANG Yinhao, DU Xunqiu, WANG Xuemei*
（*School of Resource and Environmental Engineering*, *Mianyang Teachers' College*, Mianyang 621000, Sichuan, China）

Abstract: Vegetation restoration is an effective way for ecological restoration in the dry-hot valley, and many alien species are introduced along with natural vegetation restoration. In order to compare the responses of native and alien species to water and microorganisms, the native *Albizia kalkora* and alien *Leucaena leucocephala* were selected as our research objects, and the effects of water and soil microorganisms on the growth and development of the two plants were studied by soil moisture control and soil microbial inoculation under climate chamber conditions. The results were as follows: (1) Compared with *Leucaena leucocephala*, the seed germination rate, root biomass, root-shoot ratio and plant nitrogen-phosphorus ratio of *Albizia kalkora* were significantly increased by 58.82%, 76.13%, 90.59% and 18.42%, respectively (P<0.05); (2) Under the drought conditions, the root biomass and plant nitrogen concentration of *Albizia kalkora* were significantly lower than those under moist conditions by 33.67% and 8.65% (P<0.05), and the plant height, aboveground biomass and root biomass of *Leucaena leucocephala* under drought conditions were 39.32%, 40.06% and 39.61% lower than those under moist conditions (P<0.05), indicating that drought inhibited the growth and nutrient uptake of both plants; (3) The number of nodules in the roots of *Albizia kalkora* under drought conditions was higher than that under moist conditions (P<0.05), while the number of nodules in the roots of *Leucaena leucocephala* under moist conditions

基金项目: 国家自然科学基金(32101363)。
第一作者: 石磊琦(2002—)，本科，研究方向为环境科学与工程，(E-mail)1602671221@qq.com。
***通信作者**: 王雪梅，副教授，博士，从事植物与土壤相互作用的研究，(E-mail) wangxuemei13@mails.ucas.ac.cn。

was higher than that under drought conditions; (4) Except for the proportion of dead leaf biomass, soil microbial inoculation and the interaction between soil microorganisms and water had no significant effect on the growth of *Albizia kalkora* and *Leucaena leucocephala*. The above results suggest that *Albizia kalkora* is more suitable for drought environment than *Leucaena leucocephala*, which provides a theoretical basis for the selection of species for vegetation restoration in dry-hot valleys, but the effects of soil microorganisms on plant growth are worthy of further study.
Keywords: dry hot valley, *Albizia kalkora*, *Leucaena leucocephala*, soil moisture, soil microorganisms

云南元谋干热河谷镶嵌在云南高原亚热带湿润与半湿润区，地处滇中高原北部的金沙江一级支流——龙川江下游，介于 101°35′—102°05′ E、250°25′—260°07′ N 之间（赵琳等，2006）。该区全年高温、多光照且干旱，昼间日照时长接近 16 h，年平均气温不低于 20 ℃，为各种植物的生长提供了充足的热量条件。但与此同时，该区环境与气候条件恶劣，表现在气候干旱、土壤贫瘠，植被覆盖率低，水土流失严重，生态环境及其脆弱。植被恢复是干热河谷区生态恢复的有效途径，1992 年至今，众多学者从物种筛选和恢复技术两方面开展了大量研究（杨振寅等，2007）。在物种选择上，主要从植物的耐旱性出发对物种进行筛选，并引进了很多外来物种，如桉树、银合欢、辣木、印楝、相思树等；在恢复技术上，主要从整地、育苗、抗旱保水技术等方面进行研究（周丽丽等，2021；赵保荣和杨春凤，2023）。干旱是干热河谷首要的环境胁迫因子，土壤水分条件的改善是干热河谷退化生存系统恢复与重建的关键问题（钟祥浩，2000）。同时，该区土壤类型主要为燥红土，具有缺氮、少磷、贫有机质的特点（张燕平等，2005）。在这种贫瘠的环境条件下，植物与土壤微生物间的关系也显得十分紧密（Sardans & Peñuelas, 2013）。目前，关于水分胁迫对干热河谷植物生理生长特征的影响已有较多研究，但该区土壤微生物对植物生长的影响还鲜有报道。

土壤中的水分含量会对植物的生长发育产生直接影响。水分是植物体的重要组成部分，植物的生长一般情况下是依靠吸收土壤中的水来伸长或膨大细胞实现的，膨压降低，即土壤水分过低时，植物的生长发育就会减缓甚至停止（雷丽等，2009）。同时，土壤含水量也会通过影响土壤肥力来影响植物的生长发育（李连智和韩琳，2019）。因此，对植物抗旱性的研究应运而生，不同植物适应干旱环境的能力一定程度上可以通过测定植物的生长性状来实现（Kudoyarova et al., 2013）。研究也证明了在干旱胁迫下，植物的地上生物量和地下生物量均会有所下降，但地上生物量降低程度要明显高于地下生物量的降低程度（Haffani et al., 2014）。土壤微生物是土壤活有机体的重要组成部分，与植物生长、养分吸收等密切相关，其种类、数量、活性都会影响植物的生长发育。土壤微生物对植物的影响分为直接影响和间接影响，其中，直接影响包括菌根真菌对植物的作用、固氮共生体对植物的影响、病原菌对植物的影响等；而土壤微生物对植物的间接影响是通过游离微生物实现的（王雪梅等，2017）。同时，土壤微生物对植物的影响也可分为正和负两方面，正效应通常是因为微生物群落中含有对植物生长的有益菌，例如根瘤菌的固氮作用、腐生微生物对土壤中有机质分解产生利于植物生长的无机营养；而负效应则主要是由于病原菌而引起的。有研究表明：植物对干旱的适应性响应主要取决于其土壤微生物的响应，暗示了植物面临环境胁迫不只限于适应或迁移途径，也可以得益于其周围生物群落的快速响应（Lau & Lennon, 2012）。但关于土壤微生物与水分对植物生长的交互作用并不十分清楚。

山合欢（*Albizia kalkora*）属豆科、含羞草亚科、合欢属植物，生长于溪沟边、路旁和山坡上，是干热河谷地区常见的野生乡土种，也是云南省中部高原荒山河谷造林先锋树种（崔永忠等，2010）。银合欢（*Leucaena leucocephala*）属豆科、含羞草亚科、银合欢属，原产于美洲热带地区，自 20 世纪 60 年代以来，我国开始大规模引种银合欢。由于银合欢具有较强的环境适应性、对水分要求低等特点，被列为干热河谷地区造林的优良树种，同时研究表明银合欢具有高蒸腾、低水分利用效率等特征，具有潜在的入侵植物危害属性，所以也被列为入侵植物（赵广等，2019）。段爱国等（2013）分别对山合欢和银合欢的水分利用效率进行了动态分析，从生长情况上来看，山合欢的地径略大于银合欢，但株高和冠幅均小于银合欢；从不同条件下植株的水分利用效率上来看，在干旱季，山合欢的水分利用效率要大于银合欢，而在湿润季，山合欢的水分利用效率要小于银合欢，两者对干旱胁迫的响应特征尚不明晰。此外，

豆科植物与土壤微生物关系十分密切，可形成丛枝菌根真菌（arbuscular mycorrhizal fungi, AMF）–豆科植物–根瘤菌三重共生体，是植物与微生物共生中的一种特殊类型（Igiehon & Babalola, 2018），对土壤微生物变化十分敏感（Yang et al., 2020）。目前，山合欢和银合欢对土壤微生物及其与水分交互作用的响应也还没有相关研究。

基于此，本文以干热河谷本地豆科山合欢和外来豆科银合欢为研究对象，依托当地特有的燥红土为试验土壤，采用室内控制和气候箱培养方法，通过研究水分、土壤微生物及其交互作用对山合欢和银合欢生长的影响，拟探讨以下问题：（1）山合欢和银合欢对水分胁迫的响应是否存在差异；（2）土壤微生物是否影响植物生长性状并影响植物对水分胁迫的响应。本研究的山合欢和银合欢均为干热河谷优势豆科植物，形态特征十分相似，但山合欢为本地种，银合欢为外来种，研究材料具有对比性的特色，可在植被恢复物种选择方面提供理论依据；同时，研究过程中不仅关注水分对植物生长的影响，更关注土壤微生物对植物生长的作用，拟从植被恢复技术上为该区土壤微生物功能的调节和利用提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物种子

本试验采用生长于干热河谷地区山合欢和银合欢植物的种子，种子于成熟季节从干热河谷地区采集，并经风干后保存于布袋中。山合欢种子的百粒重为（8.689±0.003） g，银合欢种子的百粒重为（5.460±0.016） g。试验时，挑选饱满、大小基本一致的种子进行试验。

1.1.2 盆栽土壤

试验用土选自野外山合欢和银合欢生长区的燥红土。经野外调研，在元谋干热河谷典型区域（101.81° E、25.67° N）进行土壤样品采集，此处同时生长着山合欢和银合欢植株，环境差异较小。采样时，分别选择 5-10 个山合欢植株采样点和银合欢植株采样点，各样点山合欢和银合欢植株大小基本一致，用铲子和锄头在紧邻植株主干周围按十字交叉法挖取四个方位土壤约 50 cm 深。为消除土壤中本身存在的微生物，将采集的山合欢和银合欢土壤样品分别置于高温高压灭菌锅中湿热灭菌（121℃、103.5 kPa）1 h，并重复灭菌 3 次，灭菌间隔时间 24 h。高温高压灭菌是土壤灭菌的有效方法，并且对土壤理化性质的影响较小（Berns et al., 2008）。郑嘉慧等（2017）研究也表明采用高温高压蒸汽法对土壤灭菌 3 次，每次间隔 24 h 可以达到很好的灭菌效果。灭菌后，为了控制非试验因素的一致性，使所有处理的土壤理化性质一致，并避免山合欢和银合欢对土壤的适应偏好，试验以灭菌混合后的山合欢土壤和银合欢土壤为基质。即取等质量的山合欢灭菌土和银合欢灭菌土混合装入灭菌的盆钵中（121 ℃、20 min），作为基质土壤。基质土的基本理化性质如下：pH 为（6.20±0.01），有机碳含量为（1.55±0.47） $g·kg^{-1}$，全氮含量为（0.43±0.05） $g·kg^{-1}$，全磷含量为（0.01±0.00） $g·kg^{-1}$，全钾含量为（0.58±0.02） $g·kg^{-1}$，有效氮含量为（15.16±3.31）$mg·kg^{-1}$，有效磷含量为（0.34±0.02）$mg·kg^{-1}$，速效钾含量为（57.26±2.29）$mg·kg^{-1}$。

1.1.3 微生物接种用土

2022 年 1 月 5 日，采集已经分别种植了 80 d 山合欢和银合欢的新鲜土壤用作微生物接种用土，经高通量测序，山合欢和银合欢土壤的微生物群落组成和多样性见表 1 所示。将采集的新鲜土壤保存于-20 ℃冰箱中备用。

表 1 山合欢和银合欢的土壤微生物群落组成与多样性

Table 1 Composition and diversity of soil microbial communities in *Albizia kalkora* and *Leucaena leucocephala*

类别 Category		指标 Index	山合欢 *Albizia kalkora*	银合欢 *Leucaena leucocephala*
细菌群落 Bacterial community	细菌门 Bacteria phylum	变形菌门 Proteobacteria	0.438±0.012a	0.475±0.014a
		放线菌门 Actinobacteria	0.164±0.011b	0.209±0.015a
		绿弯菌门 Chloroflexi	0.157±0.014a	0.125±0.006a

		酸杆菌门 Acidobacteria	0.086±0.004a	0.071±0.004b
		拟杆菌门 Bacteroidetes	0.031±0.004a	0.034±0.003a
		蓝藻门 Cyanobacteria	0.004±0.002a	0.003±0.000a
		芽单胞菌门 Gemmatimonadetes	0.041±0.007a	0.026±0.003a
		厚壁菌门 Firmicutes	0.022±0.006a	0.014±0.001a
		髌骨细菌门 Patescibacteria	0.017±0.002a	0.008±0.002b
		装甲菌门 Armatimonadetes	0.007±0.002a	0.010±0.002a
		其他 Others	0.031±0.004a	0.023±0.001a
	根瘤菌 Rhizobium	伯克霍尔德菌 *Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*	0.015±0.005a	0.014±0.002a
		慢生根瘤菌 *Bradyrhizobium*	0.014±0.006a	0.005±0.000a
		德沃斯氏菌属 *Devosia*	0.007±0.001a	0.007±0.001a
		中慢生根瘤菌 *Mesorhizobium*	0.006±0.002a	0.007±0.001a
		总根瘤菌 Total-rhizobium	0.041±0.008a	0.033±0.002a
	细菌多样性 Bacterial diversity	Chao1 指数 Chao1 index	3792.14±307.63a	3577.07±121.59a
		Observed_species 指数 Observed_species index	3542.12±245.38a	3341.13±101.66a
		香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	9.81±0.15a	9.28±0.16b
		辛普森多样性指数 Simpson diversity index	0.99±0.00a	0.98±0.00b
真菌群落 Fungal community	真菌门 Fungal phylum	担子菌门 Basidiomycota	0.660±0.024a	0.680±0.064a
		子囊菌门 Ascomycota	0.296±0.019a	0.292±0.057a
		其他 Others	0.043±0.011a	0.029±0.008a
	真菌属 Fungal genus	灵芝属 *Ganoderma*	0.641±0.025a	0.657±0.069a
		篮状菌属 *Talaromyces*	0.075±0.005a	0.082±0.018a
		青霉菌属 *Penicillium*	0.042±0.007a	0.039±0.008a
		镰刀菌属 *Fusarium*	0.016±0.002a	0.018±0.005a
		梨孢霉属 *Coniosporium*	0.022±0.005a	0.035±0.017a
		其他 Others	0.204±0.017a	0.169±0.036a
	真菌多样性 Fungal diversity	Chao1 指数 Chao1 index	265.83±17.79a	250.60±24.15a
		Observed_species 指数 Observed_species index	262.62±17.25a	245.03±23.66a
		香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	3.30±0.16a	3.04±0.50a
		辛普森多样性指数 Simpson diversity index	0.61±0.03a	0.57±0.09a

注：表中数值为平均值±标准误，n=6。同一行不同字母表示山合欢和银合欢在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异。

Note: Values are mean ± standard error, n=6. Different letters in the same row indicate significant differences between *Albizia*

kalkora and *Leucaena leucocephala* at the $P<0.05$ level.

1.2 试验设计

整个试验包括植物、水分、土壤微生物三个因素。其中，植物分为山合欢（S）和银合欢（Y）。水分处理采用传统的称重法进行控制，通过控制不同的土壤田间持水量（field capacity, FC）水平设置水分梯度（Wang et al., 2016；刘爱林等，2023）。试验前测出该区燥红土的 FC 为 12%，据此设置湿润（W）和干旱（D）两个梯度，湿润为 80%~85% FC，干旱为 40%~45% FC，对应的土壤质量含水量分别为 9.6%~10.2%和 4.8%~5.4%。微生物处理分为未接种（M_0）和接种土壤微生物（M）两种。由于不同植物下的土壤微生物群落具有差异，对本地种和外来种的反馈效应也不同，本研究主要关注植物生长过程中自身的土壤微生物对其生长发育的反馈作用，因此，山合欢处理接种山合欢土壤微生物（M_S），银合欢处理接种银合欢土壤微生物（M_Y），最终形成 SDM_0、SWM_0、SDM_S、SWM_S、YDM_0，YWM_0、YDM_Y、YWM_Y 8 种处理，每个处理设置 4 个重复。

本研究采用室内培养法，利用气候箱模拟干热河谷的温湿度条件，未考虑当地地形的影响。试验于 2022 年 2 月底开始，试验时，先称量空盆钵重量，将盆钵灭菌（121 ℃，20 min）后根据盆钵体积取等质量的山合欢灭菌土（400 g）和银合欢灭菌土（400 g）混匀后装入灭菌的盆钵中，用作盆栽基土，同时浇适量灭菌水保持土壤湿润。挑选健康、饱满的植物种子，经过浓硫酸浸泡搅拌 5 min 后破除休眠，用无菌水反复冲洗干净后播种于盆钵中，每盆播 10 颗银合欢或山合欢种子，播种后再在表面覆盖等质量的灭菌基质，放入气候培养箱（昼夜：16 h/8 h，35 ℃/25 ℃，光照度 15 000 lx）中培养。35 ℃/25 ℃的昼夜温度接近于干热河谷区植物生长季的空气温度（王雪梅等，2017）。前期保持等量足够的浇水量促使种子发芽，待所有盆钵均出现 4 株幼苗时间苗，保持每盆有 4 株幼苗。继续培养一段时间后，开始进行微生物接种处理。

土壤微生物接种参照 van de Voorde 等（2012）的方法，以接种土壤微生物悬浮液的方式进行，具体方法如下：分别以山合欢和银合欢的新鲜土壤为接种源，取质量为土壤基质 10%的新鲜土壤（即 80 g 新鲜土），按 1∶1 的土水比加入灭菌水中，混合、搅拌 2 min。将悬浮液放置 15 min 后，再次搅拌 2 min 并静置 15 min。然后筛分上清液，将上清液过 0.5 mm 筛，过滤液即为接种液，并用灭菌水冲洗至相同的体积，为一个盆钵接种量。对照处理添加等量的灭菌后的土壤悬浮液。微生物接种一个月后开始进行水分胁迫，通过称重法控制不同的田间持水量进行浇水。每天进行称重并补充灭菌水以维持含水量，并记录各盆钵每次的浇水量。同时，及时收集落叶，观察植物变化。水分胁迫 72 d 后收获植物和土壤样品进行指标测定。

1.3 指标测定方法

(1) 植物生长和生物量指标：用直尺测量植株株高；将各盆中植株地上部分和根系部分分开取样，将根系和地上部分于 65 ℃烘干至恒重后称量每盆中根系生物量和地上生物量。同时，将试验过程中收集的枯叶于 65 ℃烘干称重。每盆随机选择 20 片长势良好的叶片，将采集的叶片迅速称鲜重（W_F），然后在 5 ℃的黑暗环境中用去离子水浸泡 12 h 后用吸水纸吸去叶片表面水分，迅速称其饱和鲜重（W_R）。最后将叶片放入 65 ℃烘箱中烘干至恒重后称干重（W_D），计算相对含水量（%）=[（W_F-W_D）/（W_R-W_D）] ×100。

(2) 植物养分指标：将植株地上部分烘干后磨细，用于测定植株氮磷含量。运用凯氏定氮法测量植物氮含量，钒钼黄吸光光度法测量磷含量。

(3) 土壤指标：每盆中取一定量的、同样深度的土壤，烘干称量土壤重量含水量。通过稀释平板法测定土壤中细菌、霉菌、放线菌数量，细菌采用牛肉膏琼脂培养基，浓度梯度为 10^{-4}，放线菌采用高氏一号培养基，浓度梯度为 10^{-2}，霉菌采用孟加拉红固体培养基，浓度梯度为 10^{-2}。土壤有效氮含量采用碱解扩散法，土壤有效磷含量采用钼锑抗比色法。

(4) 共生体指标：根系取样时通过计数法统计根瘤数量。采用醋酸墨水染色法（杨亚宁等，2010）在高倍显微镜下观察菌丝、泡囊和丛枝的交叉点数，最后计算丛枝菌根真菌的侵染情况。

1.4 数据分析

本试验采用 Excel 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析。首先，用独立样本 T 检验分析山合欢和银

合欢是否存在显著性差异。其次，由于接种微生物时接种的是各自的土壤微生物，需要进行分开比较，所以要对山合欢和银合欢处理。最后，分别采用双因素方差分析法检验水分和土壤微生物及其相互作用对山合欢和银合欢的影响。通过多重比较检验不同处理下各指标的差异显著性，各个处理之间的差异性用 Turkey HSD 检验法进行多重比较，显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 水分控制情况与植物水分特征

经过试验设计，最终确定了干旱（MD_0，DM）与湿润（WM_0，WM）两种水分情况，并且以重量含水量的方式来控制干旱与湿润的情况。每天都通过重量去控制水分处于干旱或者湿润的条件下，具体浇水量结果如图 1。由图 1 可知，对于干旱和湿润的处理在浇水量上有着明显差异，干旱和湿润的处理界限明确。在试验末期（即水分处理 72 d 后收获样品期间），我们对干旱与湿润处理条件下的土壤进行了土壤含水量的测定（图 2）。通过图 2 也可以看出干旱与湿润处理的界限明确，干旱组土壤含水率平均值为 0.95%，湿润组土壤含水率平均值为 14.46%，存在显著差异，表明干旱和湿润处理的土壤水分梯度明显。由图 3 可知，在经过水分处理过后，试验末期干旱与湿润处理下植物的相对含水量具有明显的梯度差异，湿润条件下植物的相对含水量比干旱条件下的相对含水量高了 56%。

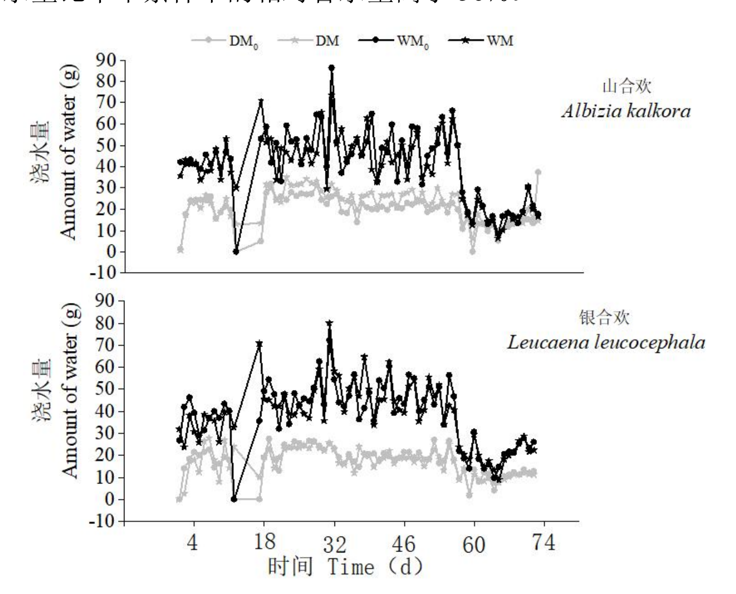
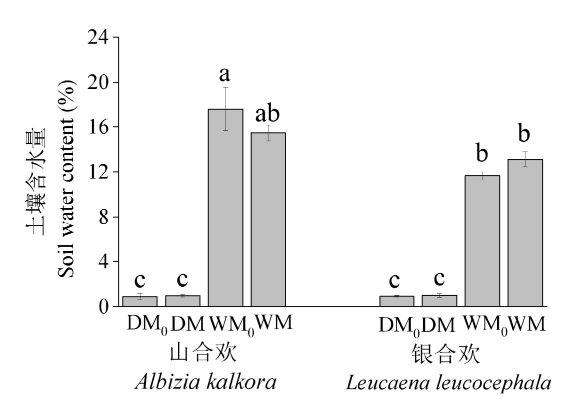


图 1 接种一个月后水分胁迫实验过程中浇水量变化

Fig.1 Changes in the amount of watering during water stress experiments one month after inoculation



图中不同小写字母表示处理之间差异显著（*P*<0.05）。下同。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments (*P*<0.05). The same below.

图 2 试验末期不同处理下土壤含水量

Fig.2 Soil water contents at the end of the experiment

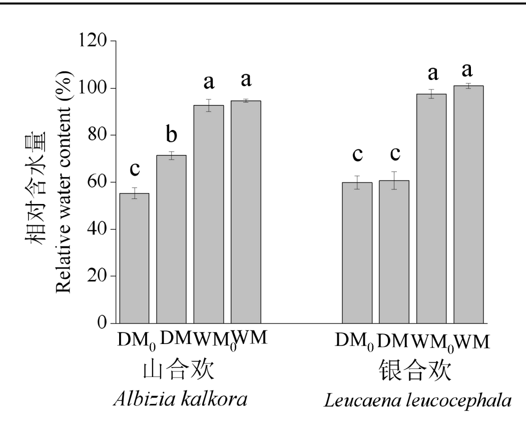


图 3 试验末期不同处理下植物的相对含水量

Fig.3 Relative water content of plants under different treatments at the end of the experiment

2.2 植物生长特征

结合统计分析结果（表 2）与山合欢和银合欢各项指标（图 4）可以看出，山合欢和银合欢在发芽率、根生物量、根冠比上有显著性差异（P<0.01）。山合欢的发芽率为 54.76%，银合欢的发芽率为 34.48%；山合欢的根生物量和根冠比分别比银合欢高 76.13%和 90.59%。就山合欢而言，不同的水分条件对其根生物量、根冠比有显著性影响（P<0.01），对枯叶生物量、枯叶比例也有影响（P<0.05）。湿润条件的山合欢的根生物量、根冠比、枯叶生物量和枯叶比例分别比干旱条件高 50.76%、46.25%、54.13%和 70.27%。就银合欢而言，不同的水分条件对株高、地上生物量、根生物量、枯叶生物量也有显著性影响（P<0.01），湿润条件下，银合欢的株高、地上生物量、根生物量和枯叶生物量分别比干旱条件高 64.79%、66.83%、65.59%和 117.27%。从微生物处理方面来看，其并未对山合欢与银合欢各项指标产生显著性影响，但微生物及水分与微生物的交互作用对山合欢的枯叶比例有影响（P<0.05），湿润条件下接种微生物处理显著增加了山合欢的枯叶比例。

表 2 对植物指标测定的差异分析

Table 2 Difference analysis of index determination for plant

指标 Index	植物 Plant	山合欢 *Albizia kalkora*			银合欢 *Leucaena leucocephala*		
		含水量 Water content	微生物 Microorganism	含水量×微生物 Water content × Microorganism	含水量 Water content	微生物 Microorganism	含水量×微生物 Water content× Microorganism
发芽率 Germination rate	<0.001***	0.213	0.973	0.329	0.943	0.979	0.932
株高 Plant height	0.122	0.183	0.181	0.308	<0.001***	0.249	0.160
地上生物量 Above-ground biomass	0.342	0.650	0.288	0.289	<0.001***	0.324	0.099
根生物量 Root biomass	<0.001***	0.004**	0.784	0.768	0.001**	0.513	0.393
根冠比 Root-shoot ratio	<0.001***	0.005**	0.414	0.418	0.487	0.727	0.513
枯叶生物量 Litter mass	0.632	0.014*	0.141	0.122	<0.001***	0.744	0.078
枯叶比例 Litter proportion	0.242	0.022*	0.046*	0.038*	0.563	0.846	0.583
植物全氮含量 Plant total N content	0.840	0.045*	0.114	0.627	0.305	0.671	0.553

植物全磷含量 Plant total P content	0.037*	0.335	0.631	0.711	0.977	0.915	0.667
植物氮磷比 Plant N：P ratio	0.023*	0.999	0.148	0.896	0.294	0.522	0.923

注：*表示 P< 0.05；**表示 P < 0.01；***表示 P < 0.001。下同。

Note: * indicates P<0.05; ** indicates P<0.01; *** indicates P<0.001. The same below.

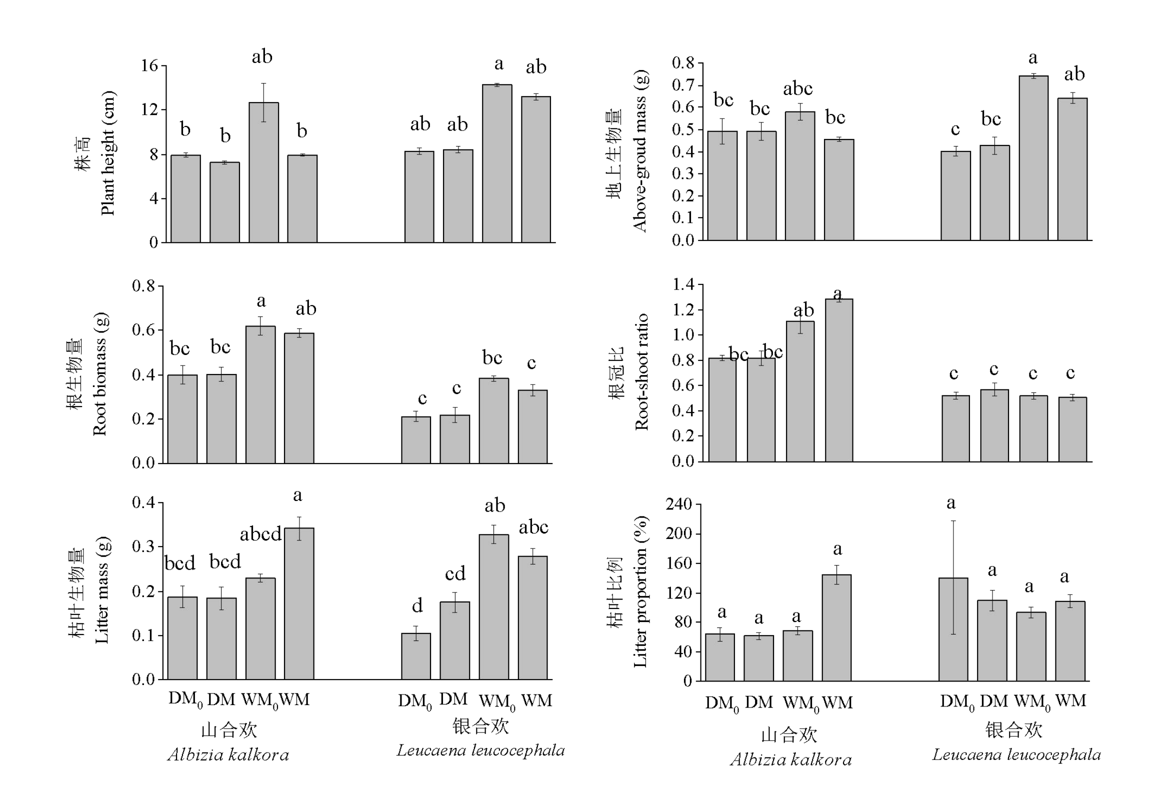


图 4 山合欢和银合欢的株高、地上生物量、根生物量、根冠比、枯叶生物量、枯叶比例

Fig.4 Plant height, above-ground biomass, root biomass, root-shoot ratio, litter mass, litter proportion of *Albizia kalkora* and *Leucaena leucocephala*

2.3 不同处理下的植物养分特征

不同处理情况下植物体地上部的氮含量、磷含量和氮磷比结果如图 5 所示。结合表 2 与图 5 分析，山合欢和银合欢的磷含量和氮磷比有显著性差异（P<0.05）。山合欢磷含量为 0.487 2 g·kg^{-1}，银合欢磷含量为 0.590 3 g·kg^{-1}，比山合欢高了 21.2%；山合欢的氮磷比（45）要显著高于银合欢（38）。水分对山合欢的氮含量具有显著性影响（P<0.05），湿润条件下山合欢的氮含量（23.13 g·kg^{-1}）比干旱条件下的氮含量（21.13 g·kg^{-1}）高 9.47%。同样，微生物及微生物与水分的交互作用对氮磷养分指标没有造成显著影响（P>0.05）。

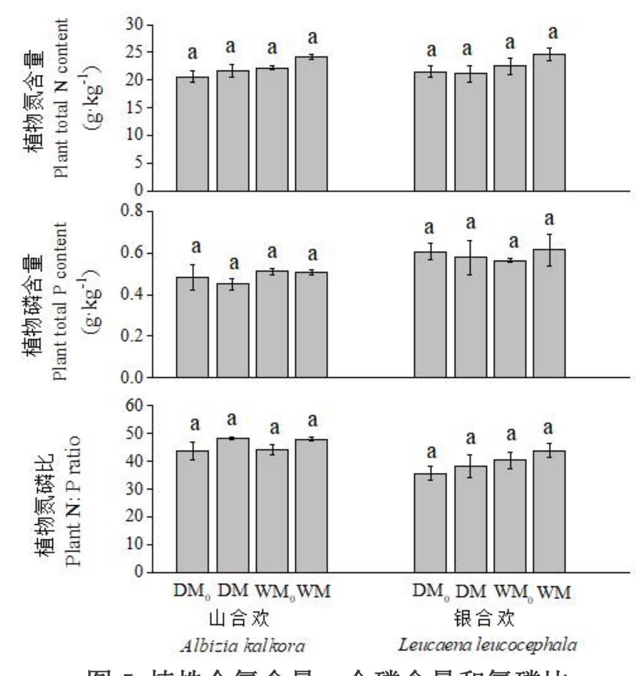


图 5 植株全氮含量、全磷含量和氮磷比

Fig.5 Plant total N content, total P content and N：P ratio

2.4 共生体特征

在收集处理植物根系的过程中，通过统计微生物处理条件下的根瘤（图 6）数量，发现在接种微生物的条件下，山合欢在干旱条件下的根瘤数目（11）比湿润条件下的根瘤数目（3.5）多（P<0.05），而银合欢在湿润与干旱条件下的根瘤数量没有显著性差异（图 7）。

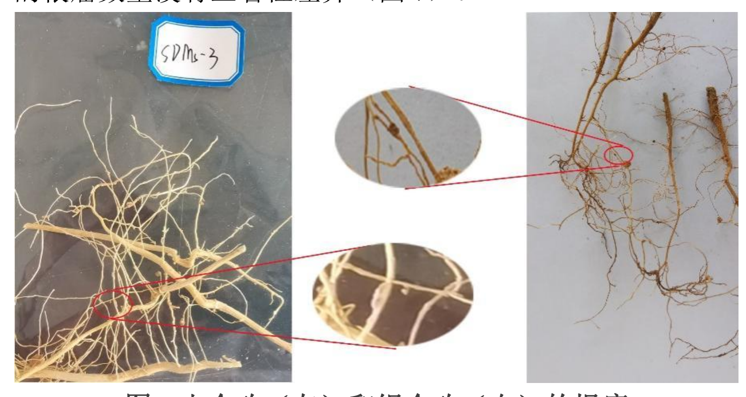


图 6 山合欢（左）和银合欢（右）的根瘤

Fig.6 Nodules of *Albizia kalkora* **(left)** and *Leucaena leucocephala* **(right)**

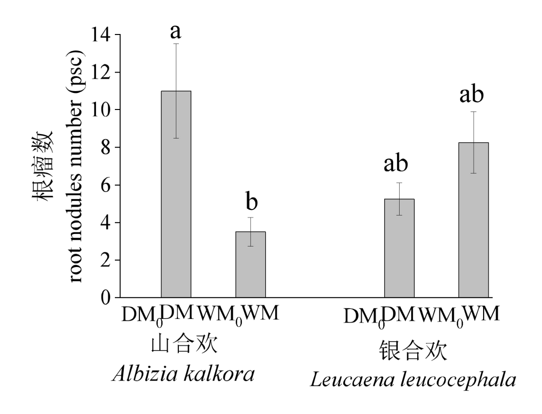


图 7 根瘤数量统计

Fig.7 Statistics of root nodules number

此外，在使用显微镜对植物根系观察的过程中，观察到只有个别样品中存在共生微生物 AMF 侵染（图 8），绝大部分山合欢和银合欢根系中未观察到 AMF 侵染。

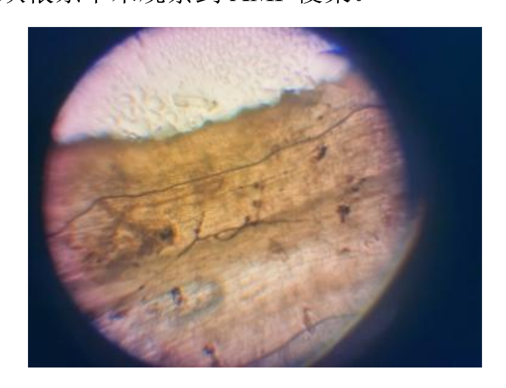


图 8 AMF 浸染

Fig.8 AMF dipping

2.5 不同处理下的土壤特征

结合方差分析结果的显著性 *P* 值表（表 3）与对土壤微生物类群的柱状图（图 9）可以看出，培养不同植物的土壤在霉菌数量上存在差异性（$P<0.05$），表现在种植山合欢的土壤霉菌数显著高于银合欢 80.81%。就山合欢而言，水分对其细菌数量有显著性影响（$P<0.01$），干旱条件下的土壤细菌数比湿润条件多 171.18%；微生物处理对其霉菌数量有显著性影响（$P<0.01$），不接种微生物的处理下土壤霉菌数比接种微生物的处理高 272.84%。就银合欢而言，微生物处理对其细菌数量有影响（$P<0.05$），不接种微生物的处理其土壤中的细菌比接种微生物的处理高 91.10%。

表 3 对土壤指标测定的差异分析

Table 3 Difference analysis of index determination for soil

指标 Index	植物 Plant	山合欢 *Albizia kalkora*			银合欢 *Leucaena leucocephala*		
		含水量 Water content	微生物 Microorganism	含水量×微生物 Water content × Microorganism	含水量 Water content	微生物 Microorganism	含水量 × 微生物 Water contentt × Microorganism
细菌数量 Bacterial quantity	0.584	0.010*	0.778	0.778	0.572	0.013*	0.383
霉菌数量 Mold quantity	0.015*	0.389	<0.001***	0.323	0.714	0.170	0.161
放线菌数量 Actinomy cetes quantity	0.779	0.892	0.214	0.409	0.086	0.792	0.030*
土壤有效氮 Soil available N	0.981	0.041*	0.002**	0.002**	0.437	0.995	0.012*
土壤有效磷 Soil available P	0.028*	0.202	0.744	0.800	0.023*	0.013*	0.262
土壤含水量 Soil water content	0.327	<0.001***	0.382	0.354	<0.001***	0.072	0.100

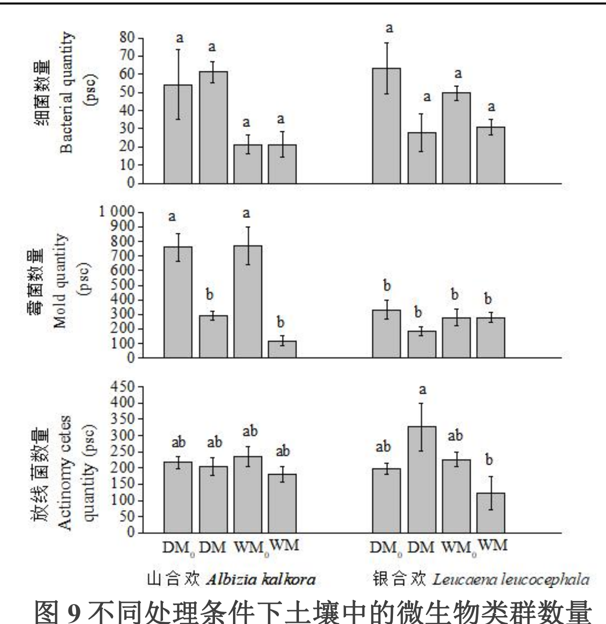


图 9 不同处理条件下土壤中的微生物类群数量

Fig.9 Number of microbial communities in the soil under different treatment conditions

分析表 3 与对土壤养分的柱状图结果可知（图 10），两种植物在土壤有效磷方面有差异性（$P<0.05$），山合欢的土壤有效磷比银合欢显著高了 43.50%。就山合欢而言，水分与微生物对土壤有效氮有显著的交互作用（$P<0.01$），干旱条件下不接种处理的土壤有效氮显著高于其他处理。就银合欢而言，水分条件和微生物处理都对其土壤有效磷有显著影响（$P<0.05$），干旱条件下土壤有效磷比湿润条件下高 72.04%，而接种微生物处理的土壤有效磷比不接种微生物处理的土壤有效磷低 45.32%。与山合欢一致，水分与微生物对银合欢的土壤有效氮具有显著的交互作用 （$P<0.05$）。此外，和种植前的培养基土相比，种植山合欢和银合欢后，土壤的有效氮降低了 26.98%，但土壤有效磷提高了 391.18%。

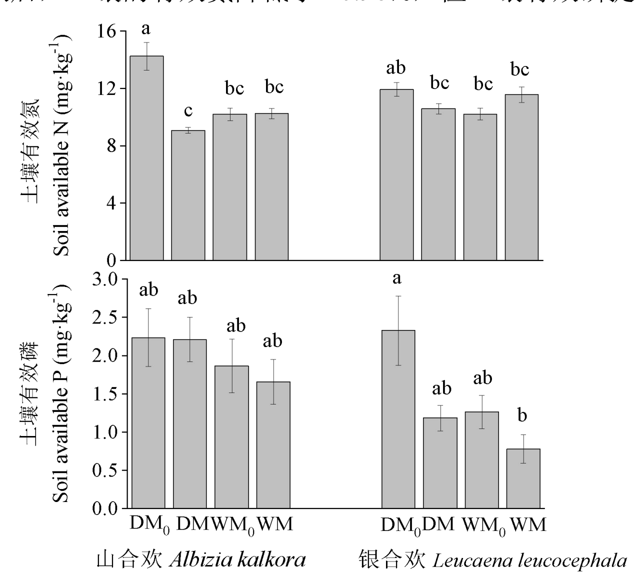


图 10 不同处理条件下土壤有效氮和有效磷含量

Fig.10 Soil available N and available P contents under different treatment conditions

3 讨论

3.1 水分对植物的影响

根据本研究数据可知，湿润条件下的植物体在株高、生物量、植物氮浓度等方面表现出要强于干旱条件下的植物体，说明干旱抑制了植物生长发育。研究表明，金沙江干热河谷区旱季土壤含水率常降至

5%以下（魏汉功和叶厚源，1991），本研究中干旱水平的土壤含水量基本达到旱季的土壤含水量水平，湿润与干旱处理的含水量与银合欢林地雨季和旱季的土壤含水量也是比较接近的（韩姣姣等，2019）。对于水分条件对本地种与外来入侵种的影响，也就是本地种与外来入侵种在抗旱性上的差异，已有部分学者做了相关研究。李玲等（2008）的研究发现，外来入侵种金钟藤（*Merremia boisiana*）在入侵地对不同水分环境的生理适应较本地早期入侵种葛藤（*Pueraria lobata*）占优势。陈明林和王友宝（2008）的研究发现，本地种酢浆草（*Oxalis corniculata*）比外来种铜锤草（*O. corymbosa*）对水分胁迫更为敏感。周蛟和张明友（1998）通过比较银合欢、念珠相思（*Acacia torulosa*）、黄豆树（*Albizia procera*）、加勒比松（*Pinus caribaea*）、山合欢五种抗旱耐热树种，认为外来种银合欢、黄豆树和加勒比松是适合元谋干热河谷的造林树种。这与本研究结论不同，本研究通过对山合欢和银合欢的对比分析发现，本地种山合欢的发芽率、根生物量、根冠比都要高于外来种银合欢，在干旱条件下山合欢的根瘤数也更多。植物将更多的生物量投资于地下有助于满足植物本身对养分和水分的强烈需求，这也是植物在水分亏缺时的重要生存对策之一，有助于植物抗旱（Zhang et al., 2004；Zhou et al., 2014）。本研究山合欢根生物量和根冠比大于银合欢，从这个方面来说，本地种山合欢相比于外来种银合欢可能更能适应干旱胁迫环境。此外，水分是影响植物吸收矿质元素的最活跃因素，矿质营养问题往往成为干旱胁迫的次生效应（da Silva et al., 2011）。本研究中干旱条件下山合欢的根瘤数比银合欢更多，较多的根瘤有利于固定更多的氮，这对缓解当地的氮限制是有利的。结合段爱国等（2013）的研究，他们发现山合欢在干旱季的水分利用效率要大于银合欢，从这个角度来讲也是本地种山合欢更适宜当地干旱环境，更适合用于当地植被恢复。杨济达等（2016）提出干热河谷地区已经成为外来植物入侵的重灾区；干热河谷植被恢复应该以本地树种为主（杨振寅等，2007）。赵广等（2019）研究认为，考虑到干热河谷区银合欢具有高蒸腾、低水分利用效率特征以及其潜在的入侵植物危害属性，今后干热河谷植被恢复物种应谨慎选择银合欢。本研究结果是与之相符的，在干热河谷植被恢复过程中我们更建议使用本地种山合欢。

3.2 土壤微生物对植物的影响

经微生物处理过后土壤微生物对土壤养分及土壤中生长的植物的生物量、土壤中的微生物数量的影响可能是通过以下几种方式：（1）接种的土壤微生物中含有能对植物养分吸收产生促进作用的细菌，如根瘤菌。（2）土壤微生物既可以通过改良土壤养分的有效性提高植物对养分的吸收，从而促进植物的生长，也可以通过生物化学作用使土壤中的养分流失或挥发到大气中，从而在一定程度上抑制植物的生长。在沈仁芳和赵学强（2015）的研究中有一些土壤微生物能够与植物根系形成共生关系，或者分布在植物根际，影响植物获得土壤养分的能力。这类微生物主要有共生固氮菌、丛枝菌根真菌、植物根际促生菌。毕银丽等（2014）的研究也表明接种微生物显著提高了植物的生物量以及植物体内氮、磷、钾等营养元素的含量，促进了植物的生长，同时提高了植物对土壤矿质元素尤其是磷元素的吸收和利用率。此外，土壤微生物对本地种和外来种的影响具有差异性。一般而言，相比于灭菌（不接种）处理，当地的土壤微生物群落对外来种具有显著的正效应，而对本地种具有负效应。张令等（2012）的研究结果表明，土壤微生物对入侵种乌桕（*Sapium sebiferum*）具有正效应；与本地种相比，入侵种乌桕幼苗总生物量、相对生长速度、根冠比以及总叶面积、叶面积比、比叶面积等生物学指标均在新鲜土壤中表现出明显优势。梁作盼等（2016）的研究结果显示，土壤微生物对紫茎泽兰（*Ageratina adenophora*）与本地植物香菜（*Rbdosia amethystoides*）的生长均具有显著的正反效应，且土壤微生物有助于增强紫茎泽兰对本地植物的竞争优势。然而，本研究并未出现类似结果，土壤微生物对山合欢和银合欢的生长并未造成显著影响。对于产生这种现象的原因我们从以下几个方面分析。

第一，试验样品可能受到了来自于空气中微生物的污染。已有研究表明空气中的微生物以气溶胶的形式存在，具有 6 大特性，即来源的多相性、种类的多样性、活性的易变性、播散的三维性、沉积的再生性、感染的广泛性（孙平勇等，2010）。因而，对于未经微生物处理的样品，空气中的微生物可直接附着于样品土壤中进行生长繁殖，争夺植物生长可利用的各种营养物质，尤其以营腐生生长的微生物为主。试验结果也表明，不接种微生物处理的土壤霉菌数显著高于接种微生物处理，其产生的霉菌可能就来自空气微生物。对于经微生物处理后的样品，空气中的各种微生物在附着于样品土壤上之后，与接种的微生物之间可能形成竞争关系，从而既影响植物对营养物质的利用，也可能抑制有益菌种对植物生长

的促进作用。

第二，接种土壤经低温冻存可能导致微生物活性降低。研究表明，土壤样品经 4 个月、-20 ℃的低温冻存显著降低了微生物群落的代谢活性（周杨等，2015）。本研究中，试验所用的接种土壤经过了大约两个月的冷冻保藏，其中的微生物数量和活性可能已经减少了很多，从而导致微生物接种没有发挥出应有的效果。

第三，微生物接种方式的影响。土壤微生物对植物的影响主要通过土壤微生物灭菌和土壤微生物接种的方法进行研究。由于土壤灭菌会造成土壤理化性质的改变，Shaw 等（1999）认为灭菌土上再接种新鲜土壤可作为非灭菌处理，并且接种密度在 1%~15%能对生物量产生效应（Pernilla et al., 2010），具体操作上包括接种过 1 mm 筛的新鲜土壤、过 1 mm 筛的土壤悬液与过 20 μm 筛的土壤悬液，以接种过 1 mm 筛的新鲜土壤对植物的影响最大（van de Voorde et al., 2012）。本研究中，为了不影响土壤中 AMF，同时减少土壤动物如线虫的影响，以接种土壤悬浮液的方式接种土壤微生物，接种后静置一段时间就将盆钵放回气候箱中。由于悬浮液并未完全下渗，还有一部分残留在表层土壤，在气候箱的风力和光照影响下悬浮液蒸干，可能导致部分微生物未接种成功，进一步造成了接种的微生物的量并不是很充足，从而导致微生物接种处理和对照处理间无显著差异。

本研究接种的土壤微生物群落中含有根瘤菌类群，但试验结束时山合欢和银合欢根系中根瘤数量还比较少。根据我们前期的试验培养结果（数据未发表），在同样的气候培养箱条件和植株条件下，山合欢和银合欢在燥红土上培养 80 d 后分别产生了 30 个和 80 个根瘤，比本研究高了接近 10 倍。这可能就是由于接种的微生物数量较低，根瘤菌少，从而使得根系中结瘤较少。此外，豆科植物不仅能与根瘤菌形成联合共生体，而且形成 AMF－豆科植物－根瘤菌三重共生体。AMF 是干热河谷生态系统的重要组成成分，干热河谷自然植被的建群种大多有丰富的 AMF（Li & Zhao, 2005；Li et al., 2010），在 Li 和 Zhao（2005）的调查研究中，山合欢和银合欢的根际土壤中也都被检测到丰富的 AMF 孢子。但我们的试验中，基本没有观察到 AMF 的侵染。基于 FUNGuild 软件对接种土的真菌功能类群进行分析发现，接种用土的真菌群落中共生营养型所占比例不到 1%，在共生营养型中，山合欢和银合欢土壤中的 AMF 相对丰度分别为 4.2%和 13.8%（数据未发表）。这说明，在接种用土的真菌群落中，AMF 的相对丰度本身是比较低的。加之试验所用的接种用土经过了一定时间的冷冻保存，其中存在的 AMF 可能进一步发生了降低，因此，AMF 侵染很少。

3.3 植物生长对土壤有效氮磷的影响

本研究中，种植山合欢和银合欢降低了培养基土的有效氮含量，但提高了基土的有效磷含量。土壤有效氮含量降低主要与植物吸收氮有关，而土壤有效磷的提高可能与植物的根系分泌物有关。吴爱姣（2021）的研究发现，在低磷胁迫下豆科植物根际可以通过分泌磷酸酶和有机酸从而使其适应低磷环境；酸性磷酸酶可以活化有机磷，释放出磷酸根离子，实现对土壤磷营养的改良（肖晓明等，2014）；有机酸可以促进土壤中难溶性磷的活化，从而导致土壤有机磷含量增加（石贵阳，2021）。因此，豆科植物在低磷条件下能产生大量有机酸，从而促进根际酸化，提高土壤中磷的有效性（赵文杰等，2011）。干热河谷燥红土属强固磷土壤，其磷素有效性低。本研究中，培养前基土的有效磷含量只有 0.34 $mg\cdot kg^{-1}$，可能对植物生长造成了低磷胁迫。从山合欢和银合欢的氮磷比来看，其氮磷比平均值为 42，较高的氮磷比（N∶P>20）通常暗示着磷限制（Zhang et al., 2015），表明山合欢和银合欢确实存在低磷胁迫。因此，山合欢和银合欢可能通过根系分泌磷酸酶和有机酸活化土壤中的有机磷，分泌质子和小分子有机酸，加速被吸附的磷溶解为有效磷而提高土壤有效磷含量。

4 结论

综上所述，干旱对植物生长性状具有一定的抑制作用，但山合欢较高的根生物量和根冠比以及干旱条件下较多的根瘤数量有利于植物对干旱条件的适应。因此，我们更推荐以本地种山合欢作为干热河谷植被恢复树种。另外，本研究中山合欢和银合欢种植明显提高了土壤有效磷含量，利用豆科植物的作用来提高燥红土磷素有效性是值得探索的新途径。

本试验虽然取得了一定的显著性结果，但仍然存在一些不足之处。本研究中，土壤微生物接种对山

合欢和银合欢生长都没有造成显著影响，这可能与本研究的微生物接种源和试验处理方式有关，在后续研究中，可从以下几点改进试验：（1）确保微生物接种用土的有效性，采集新鲜土壤及时开展试验。（2）更换微生物的接种方式。在样品中接种培养基质 10%的新鲜土壤，增加微生物数量，充分发挥接种土壤的微生物效益。另外，本研究结果主要是基于气候箱模拟条件得出的，与实际干热河谷条件可能存在一定的差异，后续研究可在原位条件下进行以便更真实地反映山合欢和银合欢的适应性差异。

参考文献：

BERNS AE, PHILIPP H, NARRES HD, et al., 2008. Effect of gamma-sterilization and autoclaving on soil organic matter structure as studied by solid state NMR, UV and fluorescence spectroscopy [J]. Eur J Soil Sci: 59: 540-550.

BI YL, CHEN SL, KONG WP, et al., 2014. Effects of microorganism inoculation on growth of soybean and its rhizosphere soil [J]. Ecol Sci, 33(1): 121-126. [毕银丽，陈书琳，孔维平，等，2014. 接种微生物对大豆生长及其根际土壤的影响[J]. 生态科学，33(1)：121-126.]

CHEN ML, WANG YB, 2008. A comparative study on the physiological properties of the exotic species *Oxalis corymbosa* and the native species *Oxalis corniculata* under water stress [J]. Acta Pratacul Sin, 17(6): 52-59. [陈明林，王友保，2008. 水分胁迫下外来种铜锤草和本地种酢浆草的生理指标比较研究[J]. 草业学报，17(6)：52-59.]

CUI YZ, LI K, SUN YY, et al., 2010. Phenotypic variation of geographic provenance of *Albizzia kalkora* in Yunnan province [J]. Guizhou Agric Sci, 38(11): 98-101. [崔永忠，李昆，孙永玉，等，2010. 云南省山合欢地理种源变异性研究[J]. 贵州农业学，38(11)：98-101.]

DA SILVA EC, NOGUEIRA R, DA SILVA MA, et al., 2011. Drought stress and plant nutrition [J]. Plant Stress: 5 (Special Issue 1): 32-41.

DUAN AG, ZHANG JG, HE CY, et al., 2013. Regional effect of photosynthesis and transpiration of the main tree species for vegetation restoration in dry season of the dry-hot river valleys [J]. J Arid Land Resour Environ, 27(7): 148-154. [段爱国，张建国，何彩云，等，2013. 金沙江干热河谷主要造林树种干季光合与蒸腾作用区域效应分析[J]. 干旱区资源与环境，27(7)：148-154.]

HAFFANI S, MEZNI M, SLAMA I, et al., 2014. Plant growth, water relations and proline content of three vetch species under water -limited conditions [J]. Grass Forage Sci, 69: 323-333.

HAN JJ, DUAN X, ZHAO YY, 2019. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River [J]. Arid Land Geogr, 42(1): 123-131. [韩姣姣，段旭，赵洋毅，2019. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理，42(1)：123-131.]

IGIEHON NO, BABALOLA OO, 2018. Below-ground-above-ground plant-microbial interactions: focusing on soybean, rhizobacteria and mycorrhizal fungi [J]. Open Microbiol J, 12: 261-279.

KUDOYAROVA GR, KHOLODOVA VP, VESELOV, DS, 2013. Current state of the problem of water relations in plants underwater deficit [J]. Russ J Plant Physiol, 60 (2): 165-175.

LAU JA, LENNON JT, 2012. Rapid responses of soil microorganisms improve plant fitness in novel environments [J]. Proc Natl Acad Sci, 109: 14058-14062.

LEI L, CHENG X, CAI XF, 2009. The space-time distribution of water content of desertifi-cation soil and their relationship with plant growth in karst rocky Guizhou [J]. Guizhou Sci, 27(2): 50-54. [雷丽，程星，蔡雄飞，2009. 贵州岩溶山区土壤含水量时空分布与植物生长关系研究[J]. 贵州科学，27(2)：50-54.]

LI L, XU ZF, WEI X, et al., 2008. Physiological compare *Merremia boisiana* with *Pueraria lobata* under drought stress and rewatering conditions [J]. Guihai, 28(6): 806-810. [李玲，徐志防，韦霄，等，2008. 金钟藤和葛藤在干旱与复水条件下的生理比较[J]. 广西植物，28(6)：806-810.]

LI LZ, HAN L, 2019. Effects of soil organic matter and moisture on greenhouse soil characteristics and plant growth [J]. S China Agric, 13(14): 188-189. [李连智，韩琳，2019. 土壤有机质和水分对温室土壤特性及

植物生长的影响[J]. 南方农业，13(14)：188-189.]
LI T, LI LF, SHA T, et al., 2010. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with two dominant xerophytes in a valley-type savanna, southwest China [J]. Appl Soil Ecol, 44: 61–66.
LI T, ZHAO ZW, 2005. Arbuscular mycorrhizas in a hot and arid ecosystem in southwest China [J]. Appl Soil Ecol, 29: 135–141.
LIANG ZP, LI LQ, WAN FH, et al., 2016. Feedback of soil biota on *Ageratina adenophora* growth and competitiveness with native plant: a comparison of different sterilization methods [J]. Chin J Eco-Agric, 24(9): 1223-1230. [梁作盼，李立青，万方浩，等，2016. 土壤微生物对紫茎泽兰生长与竞争的反馈：不同灭菌方法的比较[J]. 中国生态农业学报，24(9)：1223-1230.]
LIU AL, FU CM, LUO ZY, et al., 2023. Comparative analysis of physiological and biochemical characteristics of six native grass species in dry and hot river valley of Yunnan under drought stress [J]. J West China For Sci, 52(6):47-54. [刘爱林，伏春美，罗中阳，等，2023. 干旱胁迫下云南干热河谷区 6 个乡土草种生理生化特性的比较分析[J]. 西部林业科学，52(6)：47-54.]
PERNILLA BE, PUTTEN WH, BAKKER EJ, et al., 2010. Plant–soil feedback: experimental approaches, statistical analyses and ecological interpretations [J]. J Ecol, 98: 1063-1073.
SARDANS J, PENUELAS J, 2013. Plant-soil interactions in mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change [J]. Plant Soil, 365: 1-33.
SHAW LJ, BEATONB Y, GLOVER LA, et al., 1999. Re-inoculation of autoclaved soil as a non-sterile treatment for xenobiotic sorption and biodegradation studies [J]. Appl Soil Ecol, 11: 217-226.
SHEN RF, ZHAO XQ, 2015. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants [J]. Acta Ecol Sin, 35(20) : 6584-6591. [沈仁芳, 赵学强, 2015. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报, 35(20): 6584-6591.]
SHI GY, 2021. Physiological mechanism and proteomics of soybean root response to low phosphorus stress [D]. Guiyang: Guizhou University: 9-33. [石贵阳，2021. 大豆根系响应低磷胁迫的生理机制及蛋白组学初探[D]. 贵阳：贵州大学：9-33.]
SUN PY, LIU XL, LIU JINLING, et al., 2010. Research progress on air microorganism [J]. Chin Agric Sci Bull, 2010, 26(11): 336-340. [孙平勇，刘雄伦，刘金灵，等，2010. 空气微生物的研究进展[J]. 中国农学通报，26(11)：336-340.]
VOORDE TFJ, PUTTEN WH, MARYIJIN BT, 2012. Soil inoculation method determines the strength of plant-soil interactions [J]. Soil Biol Biochem, 55: 1-6.
WANG XM, YAN BG, ZHAO G, et al., 2017. Effects of microorganism on carbon, nitrogen and phosphorus of *Dodonaea viscosa* and the soils from different elevations in Yuanmou, Yunnan, China [J]. Chin J Plant Ecol, 41(3): 311-324. [王雪梅，闫帮国，赵广，等，2017. 云南元谋不同海拔土壤微生物对车桑子碳、氮、磷化学计量特征及土壤特性的影响[J]. 植物生态学报，41(3)：311-324.]
WANG XM, ZHAO L, YAN BG, et al., 2016. Morphological and physiological responses of *Heteropogon contortus* to drought stress in a dry-hot valley [J]. Bot Stud, 57(1): 1-12.
WEI HG, YE HY, 1991. Study on the evaluation of site quality of soil moisture content in dry season in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. J West China For Sci, 1991(2): 48-51. [魏汉功，叶厚源，1991. 金沙江干热河谷旱季土壤含水率评价立地质量的研究[J]. 云南林业科技，1991(2)：48-51.]
WU AJ, 2021. Mechanisms of root responses to low phosphorus stress in different crop species/genotypes with contrasting root system [D]. Xianyang: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education: 51-91. [吴爱姣，2021. 不同根系类型作物/品种的根系对低磷胁迫的响应机制[D]. 咸阳：中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心：51-91.]
XIAO XM, LIU JS, ZHOU C, et al., 2014. Difference of root exudates from macadamia seedlings under different

phosphorus supply [J]. Chin J Trop Crop, 35(2): 261-265. [肖晓明，刘军生，周程，等， 2014. 不同磷水平下澳洲坚果幼苗根系分泌物的差异[J]. 热带作物学报，35(2)：261-265.]

YAND ZY, SU JR, LUO D, et al., 2007. Progress and perspectives on vegetation restoration in the dry-hot valley [J]. For Res, 20(4):563-568. [杨振寅，苏建荣，罗栋，等，2007. 干热河谷植被恢复研究进展与展望[J]. 林业科学研究，20(4)：563-568.]

YANG GW, ROY J, VERESOGLOU SD, et al., 2020. Soil biodiversity enhances the persistence of legumes under climate change [J]. New Phytol, 229(5): 2945-2956.

YANG JD, ZHANG ZM, SHEN ZH, et al., 2016. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan [J]. Biodivers Sci, 24(4): 462-474. [杨济达，张志明，沈泽昊，等，2016. 云南干热河谷植被与环境研究进展[J]. 生物多样性，24(4)：462-474.]

YANG YN, BA L, BAI XN, et al., 2010. An improved method to stain arbuscular mycorrhizal fungi in plant roots [J]. Acta Ecol Sin, 30(3)：774-779. [杨亚宁，巴雷，白晓楠，等，2010. 一种改进的丛枝菌根染色方法[J]. 生态学报，30(3)：774-779.]

ZHANG L, WANG H, CHEN NN, et al., 2012. Effects of soil biotic communities on the seedling performance of native and invasive provenances of *Triadica sebifera* [J]. J Biosaf, 21(1):41-45. [张令，王泓，陈楠楠，等，2012. 土壤微生物对不同种源乌桕生长的影响[J]. 生物安全学报，21(1)：41-45.]

ZHANG W, ZHAO J, PAN F, et al., 2015. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China [J]. Plant Soil, 391: 77–91.

ZHANG X, ZANG R, LI C, 2004. Population differences in physiological and morphological adaptations of *Populus davidiana* seedlings in response to progressive drought stress [J]. Plant Sci, 166: 791-797.

ZHANG YP, ZHAO FX, LIU XX, et al., 2005. Relationship between growth increment of *Azadirachta indica* and site condition in hot and arid valley [J]. For Res, 18(1): 74-79. [张燕平，赵粉侠，刘秀贤，等，2005. 干热河谷印楝生长与立地条件关系[J]. 林业科学研究，18(1)：74-79.]

ZHAO BR, YANG CF, 2023. Vegetation restoration techniques for difficult sites in dry and hot valley of Yuanjiang River [J]. For Invent Plan, 48(6):48-52. [赵保荣，杨春凤，2023. 元江干热河谷困难立地植被恢复技术[J]. 林业调查规划，48(6)：48-52.]

ZHAO G, JIN J, HAN XQ, et al., 2019. Photosynthetic characteristics of three typical trees for vegetation restoration in dry season of dry-hot valley [J]. SW China J Agr Sci, 32(1):81-86. [赵广，金杰，韩学琴，等，2019. 干热河谷旱季 3 种典型植被恢复树种光合生理特征[J]. 西南农业学报，32(1)：81-86.]

ZHAO L, LANG NJ, ZHENG K, et al., 2006. A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan province [J]. For Invent Plan, 31(3): 114-117. [赵琳，郎南军，郑科，等，2006. 云南干热河谷生态环境特性研究[J]. 林业调查规划，31(3)：114-117.]

ZHAO WJ, ZHANG LJ, CHANG Q, et al., 2011. The research progress of organic acids metabolism in leguminous plant under phosphorus deficiency [J]. Prat Acul Sci, 28(6): 1207-1213. [赵文杰，张丽静，畅倩，等，2011. 低磷胁迫下豆科植物有机酸分泌研究进展[J]. 草业科学，28(6)：1207-1213.]

ZHENG HH, CHEN HX, LI JQ, et al., 2017. The effects of different soil sterilization treatments on soil microbial activity [J]. J Fudan Univ (Nat Sci), 56(6): 681-691. [郑嘉慧，陈鸿洋，李金全，等，2017. 不同土壤灭菌方法对土壤微生物活性的影响[J]. 复旦学报(自然科学版)，56(6)：681-691.]

ZHONG XH, 2000. Degradtion of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 9(3):376-383. [钟祥浩，2000. 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径[J]. 长江流域资源与环境，9(3)：376-383.]

ZHOU J, ZHANG MY, 1998. Study on quantitative selection of drought resistant and heat resistant afforestation on species in Yuanmou [J]. Yunnan For Sci Tech, 1998(3):33-37. [周蛟，张明友，1998. 元谋抗旱耐热造林树种的定量选择研究[J]. 云南林业科技，1998(3)：33-37.]

ZHOU LL, LI SB, PAN H, et al., 2021. Characteristics of soil nutrient and enzyme activities in plantations of

Eucalyptus urophylla × *E. grandis* and five *Acacia Species* [J]. J Trop Subtrop Bot, 29(5):483-493. [周丽丽，李树斌，潘辉，等，2021. 5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征[J]. 热带亚热带植物学报，29(5)：483-493.]

ZHOU P, AN Y, WANG Z, et al., 2014. Characterization of gene expression associated with drought avoidance and tolerance traits in a perennial grass species [J]. PLoS ONE, 9: e103611.

ZHOU Y, CUI H, ZHU HH, et al., 2015. Effects of long-term soil storage on the metabolic activity and functional groups of soil microbial community [J]. Microbiol China, 42(6): 1017-1024. [周杨，崔航，朱红惠，等，2015. 土壤样品长期保存对微生物群落代谢活性和功能类群的影响[J]. 微生物学通报，42(6)：1017-1024.]